

HL-3 装置二号中性束注入束线量热靶研制

周博文 唐珮钦 万银祥 余珮炫 罗怀宇 魏会领 耿少飞*

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 在中性束注入器中, 量热靶是非常重要的水冷部件之一, 承担着接收和测量束功率的任务。除此之外, 利用内置热电偶阵列的方式, 可以即时的监测靶板不同位置的温升, 进而获得引出离子束或中性束的功率密度分布。在 HL-3 装置二号中性束注入束线上, 量热靶的设计采用了一种利用直线推杆机构实现升降, 并采用“W”字型靶板结构实现中性束能量的吸收。此外, 利用 Ansys Workbench 的流体计算模块对量热靶在满功率运行状态下的温度分布做了模拟计算, 结果显示量热靶的设计满足二号中性束注入束线的使用要求。

关键词 中性束注入器; 量热靶; 有限元计算

中图分类号 TL628

Development of the calorimetry target on second neutral beam injection beam line of HL-3 device

ZHOU Bowen TANG Peiqin WAN Yinxian YU Peixuan LUO Huaiyu WEI Huiling GENG Shaofei*

(southwest institution of physics, chengdu, 610000, china)

Abstract [Background]: In neutral beam injectors, the calorimetric target is one of the most important water-cooled components, responsible for receiving and measuring beam power. In addition, by using a built-in thermocouple array, the temperature rise at different positions of the target plate can be monitored in real-time, thereby obtaining the power density distribution of the extracted ion beam or neutral beam. [Purpose]: Develop a calorimetric target for the neutral beam injector in the HL-3 device, which can meet the requirements of target plate lifting and thermal load absorption. [Methods]: The design of the calorimetry target adopts a linear push rod mechanism to achieve lifting and lowering, and adopts a "W" - shaped target plate structure to achieve absorption of neutral beam energy. In addition, the fluid calculation module of Ansys Workbench was used to simulate the temperature distribution of the calorimetry target under full power operation. [Results]: Under full power operating conditions, the deflecting magnet is opened, and the maximum temperature rise of the calorimetry target is 526.4 degrees Celsius, which can be lowered to room temperature within half a minute, meeting the requirements for the use of the beam line. [Conclusions]: Successfully developed a calorimetric target that meets usage requirements.

Key words Neutral beam injectors, Calorimetric target, Finite element calculation

量热靶是中性束注入器中的一个重要部件。高能束粒子打到量热器上后将携带的高能量传递给靶板, 引起靶板温度上升, 随着热传导和对流换热的进行, 沉积在靶板内部的能量逐渐由冷却水带走, 达到吸收、转移束能量的目的。测量出水和进水的温差以及水的流量, 即可通过积分的方式计算出接收到的总的束能量。除此而外, 量热靶还可以通过内置的热电偶阵列即时的测量不同位置的温升信号, 进而确定束分布、束散角, 以及确定束对中的情况^[1]。在中国环流器 3 号装置二号中性束束线中, 量热靶安装在偏转磁体与

西物创新行动项目《7MW 中性束注入器关键技术研究》(202201XWCX001) 资助

第一作者: 周博文, 男, 1991 年出生, 2017 年于西南交通大学获硕士学位, 研究领域中性束加热系统

通讯作者: 耿少飞, E-mail:gengsf@swip.ac.cn

收稿日期: 20XX-00-00, 修回日期: 20XX-00-00

刮削器之间，如图 1 所示，图中虚线框内为量热靶，其端面距离离子束引出面 3100mm。HL-3 装置 7MW 中性束注入器离子源放电参数的设计值为：120kV×40A，脉冲宽度 5s，单个离子源的引出功率为 4.8MW。每条中性束注入器配备四个离子源，合计最高引出功率为 19.2MW。

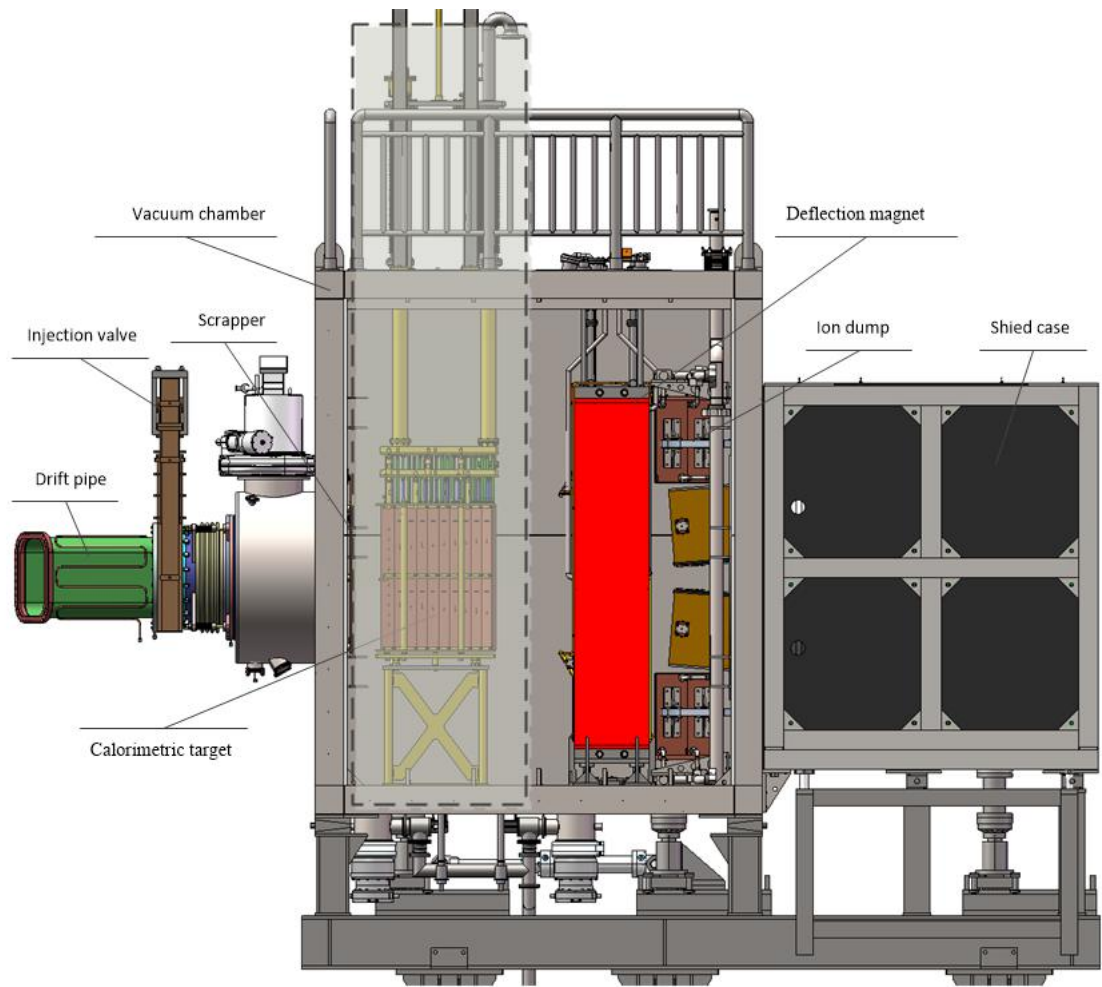


图 1 注入器布局图
Fig.1 Injector layout diagram

1 量热靶的结构设计

对于中性束注入加热束线，量热靶主要用于调试和标定实验，当中性束注入等离子体中时，需要将靶板移开，让出中性束传输通道。HL-3 装置 7MW 中性束加热束线注入器 W 字形量热靶采用垂直方向升降方式，NBI 调试实验时，需要将量热靶降落到束对中位置，当 NBI 加热实验时，提升量热靶，让出束传输通道。量热靶的整体结构如图 2 所示，主要由底部支撑，“W”字形铜靶体，水冷管路和升降机构四部分组成。

量热靶底部支撑整体是由 304 不锈钢焊接而成的框架结构，上下为整块不锈钢钢板，四根立柱间焊接有“X”形的加强筋板。在安装时，将底部支撑调整就位后，与真空室底板焊接。底部支撑上方安装有四个高度可调的支撑腿，在实验调试阶段（中性束不注入装置时），当靶板位于下止位，靶板整体重量由底部支撑承受。同时，支撑上方还有两个锥形定位销，与靶体下方的定位孔对应，确保靶板在下降到位后，铜靶体的位置能对准束流中心。

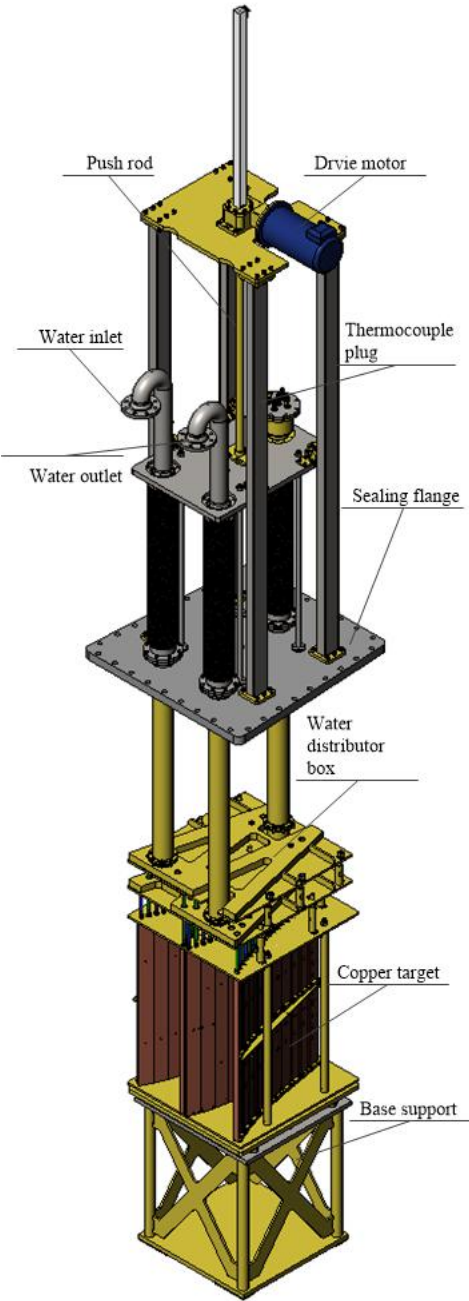


图 2 量热靶结构图

Fig.2 Calorimetry target structure diagram

“W”字形铜靶体是量热靶上最重要的一个部件，承担着吸收中性束束功率和测量束流分布的作用。根据束线的设计参数，离子源加速电压为 120keV，单个离子源的引出束流为 40A，在不考虑中性化的情况下，在量热靶入射端面，中性束和离子束的混合功率密度如图 3 所示，束流中心的功率密度高达 12.8kW/cm²。一般来说，铜靶板可承受的极限功率密度为 2kW/cm²，如果将束流能量垂直直接打在铜靶板上，无氧铜靶板会在热交换前软化，不能安全使用。因此，铜靶板的设计采用“W”字形。在束流的中心位置，靶板承受的热负荷最高，而越往靶板开口侧，束流密度越低。考虑到靶板整体的长度问题，将靶体设计成张口逐渐扩大的喇叭口形状。每个喇叭口由 20 条无氧铜靶条组成，每根靶条宽度为 80mm，高度 1020mm，厚度为 25mm。每根靶条内部加工直径 12mm 的两个深孔，用于进出冷却水。中心位置两块无氧铜靶条的角度最小，为 12°，开口处的两根靶条的角度最大，为 46°。同时，量热靶作为一个测量部件，需要通过内置

的热电偶阵列即时的测量不同位置的温升信号，进而确定束分布、束散角，以及确定束对中的情况。因此，根据束流的汇聚角度，在束流中心的每跟靶条上安装 10 跟热电偶，外侧每根靶条沿束流汇聚方向安装上下两根热电偶。靶板的开口角度和热电偶位置如图 4 所示。

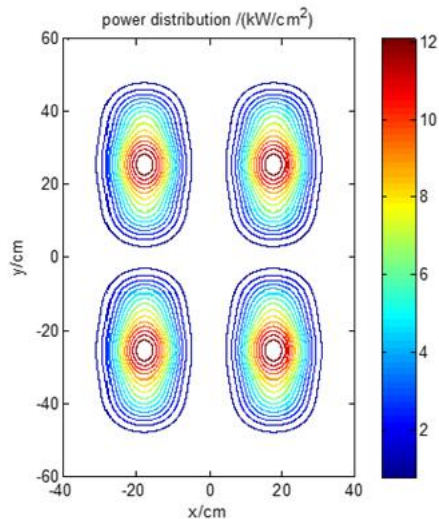


图 3 量热靶入射端面全能量束功率分布

Fig.3 The power distribution of the whole energy beam at the incident end face of the calorimetric target

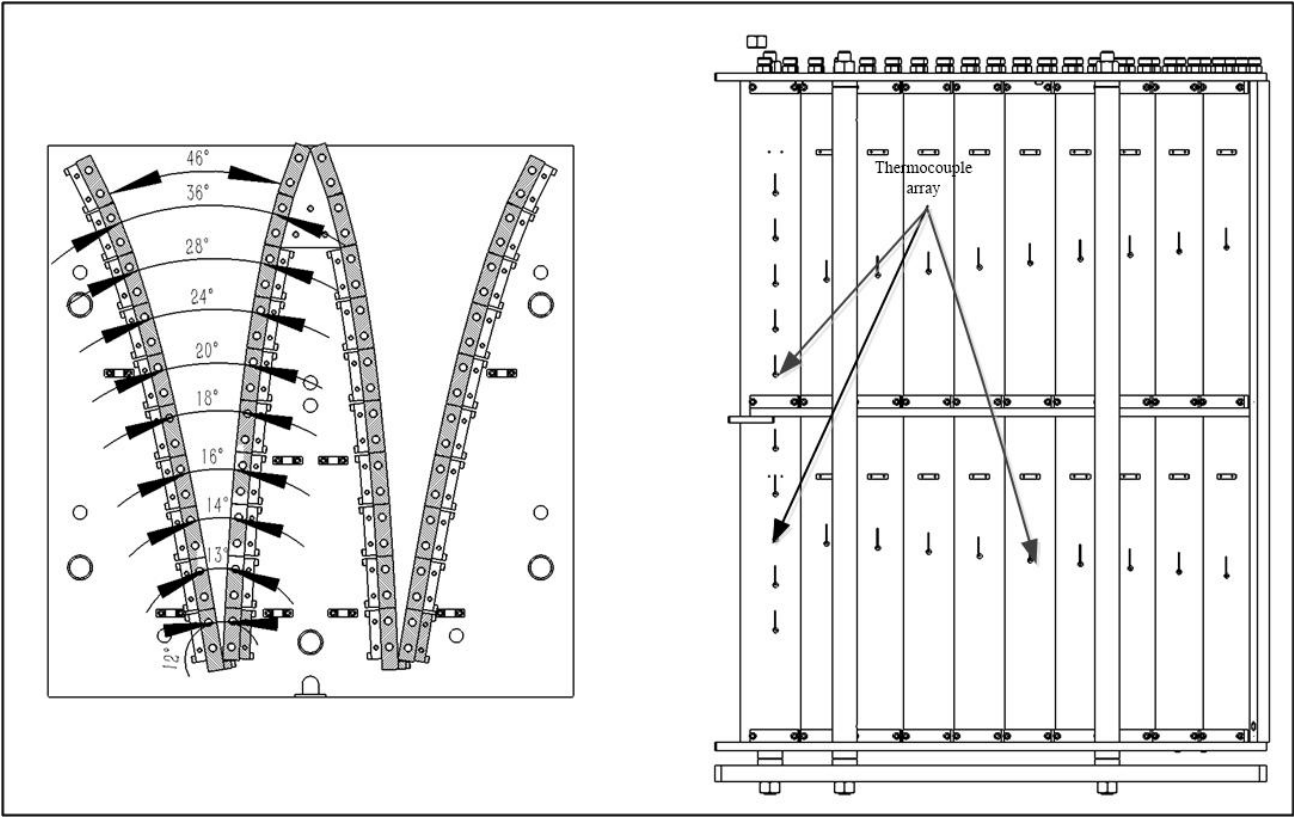


图 4 靶板开口角度和热电偶布局

Fig.4 Target opening angle and thermocouple layout

在各水冷部件中，量热靶的任务最为繁重，与其他水冷部件相比，它承受着最高的热负荷——在未注入的情况下，偏转磁铁关闭时，量热靶将承受 80%左右的中性束引出功率，在偏转磁铁开启时，量热靶承受的热负荷依然高达总引出功率的 50%。因此，为尽可能的提高冷却效率，在量热靶靶体上方设计了 2 个对应靶体的“W”字形分水盒，将每根靶条的进出水并联。从每个分水盒引出一根直径 80mm 的不锈钢管。当量热靶的水流量为 150m³/h 时，靶条内的水流速为 9.3m/s。

量热靶的升降机构由四根支撑立柱，驱动电极，直线推杆，叠片波纹管以及连接板组成。根据中性束注入器的设计要求，量热靶在中性束注入装置时，应完全让出束流通道，因此，靶板的提升高度应达到 1100mm。提升的负载为无氧铜靶体，水路及连接板，总重量约 1.5 吨。原来中性束一号束线采用卷扬机构，由电机带动齿轮减速器拉动牵引靶体的钢丝绳进行升降。但是齿轮减速器结构复杂，且重量较大，安装在量热靶顶部后难以拆卸，造成量热靶安装时的诸多不便。因此，选取市场上成熟的电动推杆机构，结构简单，重量小，可将量热靶靶体安装完成后在进行升降机构的安装，且成本也较低。电动推杆的选项如下：丝杆直径 32mm，推力 30kN，涡轮蜗杆减速比 1：7.25。在升降过程中，四根立柱同时作为轨道，提升连接板上安装有滑轮，保证整个靶体垂直起落。在立柱上下相应位置安装接触开关，在靶板提升或降落到指定位置后，输出到位信号给控制系统，以便监测靶板位置状态。

2 量热靶的热分析计算

量热靶的能量传递主要方式是热传导。利用 Ansys 模拟量热靶的传热过程，可以计算任意中性束功率下的量热器的最高温升，并借此确定惯性量热器投入使用时的中性束功率和脉冲宽度的安全范围。为了方便计算，选取二分之一模型进行模拟计算，并在计算前，做如下假定：1、忽略靶板因热辐射而损失的能量；2、忽略冷却水温升引起的水的热物性变化；3、假定靶板初始温度分布均匀，初始温度为 20 摄氏度。分析计算按以下两种工况进行：

工况一：满功率运行，水流量 120m³/h，脉宽 5s，中性化效率 50%，偏转磁体打开。

这种工况将会是二号中性束束线满功率稳定运行的工况。计算结果如图 5 所示，根据计算结果，中性束满功率运行 5 秒后，量热靶靶板的最高温度达到 526.5 摄氏度，而铜的熔点为 1084 摄氏度，说明靶板能够承受满功率的中性束。同时在放电停止后，靶板温度开始下降，在第 30 秒靶板的最高温度降低至 22.6 摄氏度，见图 6。因此靶板设计满足使用要求。

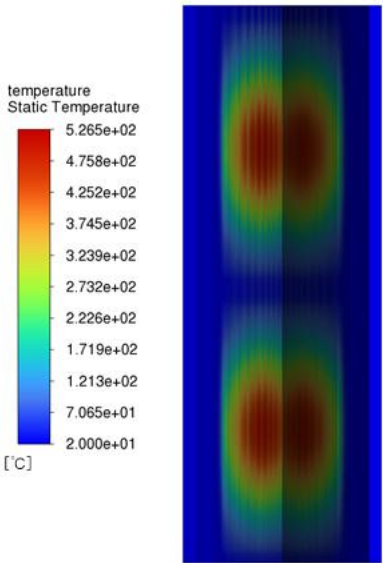


图 5 工况一计算结果
Fig.5 calculation results of case I

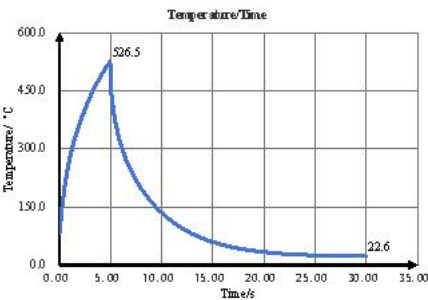


图 6 开始放电 30 秒内的温度变化

Fig.6 temperature variation within 30s of starting discharge

工况二：满功率运行，水流量 150m³/h，脉宽 5s，偏转磁体关闭。

该工况为极限工况，当偏转磁体关闭时，中性束和离子束的全部能量都打在靶板上。计算结果如图 7 所示，从图中可以看出，极限工况下靶板温升达到 987 摄氏度，接近无氧铜的熔点。因此，在满功率运行状态下，必须开启偏转磁体，将离子束偏转至吞噬器以保护量热靶。

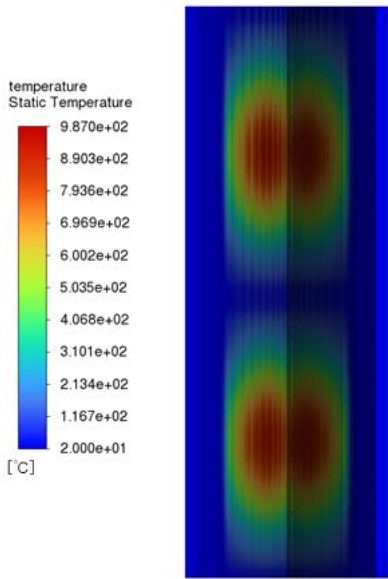


图 7 工况二计算结果

Fig.7 calculation results of case II

3 研制进展

经过工程细化后，量热靶的各个零部件加工已经完成，正在进行安装调试，如图 8 所示。完成安装调试后，量热靶将安装在注入器上进行真负载测试。



图 8 安装中的量热靶

Fig.8 Calorimetric targets in installation

4 结语

本文根据 HL-3 装置二号中性束注入束线的设计参数，设计了量热靶的总体结构，对于承受热量的靶体部分，采用了“W”字形的无氧铜靶条拼接的方式，扩大了散热面积。对于量热靶的升降机构，采用了成熟的电动推杆结构，相比一号束线不仅降低了成本，还简化了安装流程。此外，还对靶体进行了热力学计算，计算结果显示，在满功率运行条件下，偏转磁体打开，量热靶最大温升为 526.4 摄氏度，且能在半分钟内降至室温，满足束线的使用要求。但一旦偏转磁体关闭，量热靶温升可达 987 摄氏度，有融化风险。

致谢 感谢中核同创科技有限公司对本文贡献。

作者贡献：周博文：概念设计，机械设计及建模，数据分析，数据可视化，初稿撰写；唐珮钦：仿真计算；万银祥：数据整理；余珮炫：数据可视化；罗怀宇：机械设计；魏会领：论文审阅与修订；耿少飞：研究资金获取，项目管理，课题监管与指导。

参考文献

- 1 刘鹤,曹建勇,杨宪福.中性束装置惯性量热器传热模拟及实验研究[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第二卷)——中国核学会 2011 年学术年会论文集第 7 册(核电子学与核探测技术分卷、脉冲功率技术及其应用分卷、核聚变与等离子体物理分卷).核工业西南物理研究院,2011:10.
- 2 秦运文编著,托卡马克实验的物理基础,原子能出版社,ISBN 978-7-5022-5218-2, P587.
- 3 Strachan J D, Adler H, Alling P, et al., Fusion energy production from TFTR plasmas fueled with deuterium and tritium. Phys. Rev. Lett. Vol.72 (1994), 3526.
- 4 Solder F X, Baranov Yu F, et al., Approach to steady state high performance in DD and DT plasmas with optimized shear in JET. Nucl. Fusion, Vol.39 (1999), 407. DOI: 10.1088/0029-5515/39/11Y/329
- 5 Fujita and the JT-60 team, High-performance experiments towards steady-state operation in JT-60U. Plasma Phys. Control. Fusion 39 (1997), B75. DOI: 10.1088/0741-3335/39/12B/006
- 6 袁保山, 姜韶凤, 陆志鸿编著. 托卡马克装置工程基础, 第 11 章, 北京, 原子能出版社, 2011.

- 7 YU Liming, CHEN Wei, JI Xiaoquan, et al. , Observation of Multiple Broadband Alfvénic Chirping Modes in HL-2A NBI Plasmas[J].Chinese Physics Letters,2021,38(05):47-51. DOI: 10.1088/0256-307X/38/5/055202
- 8 K.TSUMORI ,Y.TAKEIRI ,K.NAGAOKA, et al. , High Power Neutral Beam Injection in LHD[J].Plasma Science and Technology,2006,8(01):24-27.DOI:10.1088/1009-0630/8/1/6
- 9 曹建勇,魏会领,耿少飞,等.HL-2M 装置 NBI 加热系统规划及束线研究进展[J].核聚变与等离子体物理,2021,41(S2):489-494.DOI:10.16568/j.0254-6086.2021s2011.
- 10 周红霞,曹建勇,余珮炫,等. HL-2M 装置中性束加热系统水冷系统工程设计[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第六卷)——中国核学会 2019 年学术年会论文集第 7 册(计算物理分卷、核物理分卷、粒子加速器分卷、核聚变与等离子体物理分卷、脉冲功率技术及其应用分卷、辐射物理分卷、核工程力学分卷、核测试与分析分卷).中国原子能出版社,2019:6.DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.056442.
- 11 周博文,邹桂清,曹建勇,等.HL-2M 装置中性束离子源束光学红外成像实验研究[J].核聚变与等离子体物理,2018,38(01):42-47.DOI:10.16568/j.0254-6086.201801007.
- 12 魏会领,曹建勇,余珮炫,等.HL-2M 装置 5 MW 中性束加热束线离子源放电室研制[J].强激光与粒子束,2020,32(04):127-131. DOI:10.11884/HPLPB202032.190275
- 13 He Liu, Jianyong Cao, Huiling Wei, et al.,The latest progress of the 1st NBI beamline on HL-2M Tokamak,Fusion Engineering and Design,Volume 123,2017,Pages 448-452,ISSN 0920-3796,DOI:10.1016/j.fusengdes.2017.02.109.
- 14 X T DING , W CHEN. Review of the experiments for energetic particle physics on HL-2A[J].Plasma Science and Technology,2018,20(09):97-109. DOI 10.1088/2058-6272/aad27a